

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Пилипенко Олександр Валерійович



УДК 621.793.8;316.8

**ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТА МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ
ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ СИСТЕМ
НА ОСНОВІ Fe, Ni та Ag або Au**

Спеціальність 01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, професор
Одноворець Лариса Валентинівна,
Сумський державний університет, професор
кафедри електроніки, загальної та прикладної
фізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Дехтярук Леонід Васильович,
професор кафедри фізики Харківського
національного університету будівництва
та архітектури, м. Харків;

кандидат фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Данильченко Сергій Миколайович,
завідувач відділом радіаційної біофізики
Інституту прикладної фізики НАН України,
м. Суми.

Захист відбудеться 01 липня 2019 року о 13-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 в Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус БІЦ, ауд. Б-308.
E-mail: d55.051.02@sumdu.edu.ua

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, та на сайті інституційного репозитарію СумДУ.

Режим доступу : <https://sumdu.edu.ua/uk/science/science-info/scientific-infrastructure/specialized-council/111-55-051-02.html>

Автореферат розіслано « 29 » травня 2019 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю. О. Шкурдода

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вивчення фізичних властивостей плівкових систем на основі феромагнітних і благородних металів залишається актуальною тематикою як фізики твердого тіла, так і матеріалознавства мікроелектроніки. У зв'язку з цим до таких матеріалів ставлять високі технологічні вимоги: термічна стійкість структурно-фазового складу і стабільність або, навпаки, чутливість робочих характеристик до дії температури, деформації, магнітного поля тощо. Досягти цього можна насамперед підібравши метод (пошарова або одночасна конденсація компонент) та умови формування (тиск у вакуумній камері, швидкість конденсації, температура підкладки) плівкових матеріалів, а також змінюючи товщину чи концентрацію атомів окремих компонент системи. Широке використання явища гігантського магнітопопу (ГМО) у приладобудуванні спричинило нову хвилю як експериментальних, так і теоретичних досліджень властивостей плівкових систем із спин-залежним розсіюванням електронів.

На сьогодні досить детально вивчені магнітні властивості плівкових систем на основі Fe, Ni, Ag і Au. Поряд із цим маловивченими залишаються електрофізичні (питомий опір, термічний коефіцієнт опору – ТКО, коефіцієнт тензочутливості – КТ), магніторезистивні (магнітоопір – МО, анізотропний магнітоопір – АМО), магнітооптичні (ефект МОКЕ) властивості та їх концентраційні й розмірні залежності для плівкових систем на основі феромагнітних і благородних металів, в яких формуються тверді розчини (т. р.).

Із вище зазначеного випливає доцільність комплексного дослідження кристалічної структури, фазового складу, розмірної, концентраційної й температурної залежностей електрофізичних, магніторезистивних та магнітооптичних властивостей плівкових систем на основі феромагнітних металів і сплавів (Fe, Ni) та благородних (Ag і Au) металів.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету в рамках держбюджетних тем: «Термостабільні металеві спин-клапани для реалізації спінових каналів в компонентах гнучкої сенсорної електроніки» (2017–2020 рр.) № 0117U003925; «Вплив процесів гранулізації і спин-залежного розсіювання електронів на фізичні властивості плівкових твердих розчинів» (2015–2017 рр.) № 0115U000689 «Електрофізичні і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів із спин-залежним розсіюванням електронів» (2012–2014 рр.), № 0112U00138, та спільного проекту науково-технічного співробітництва «Фазові перетворення, дифузійні процеси і магніторезистивні властивості мультишарів на основі Fe і Pd, Pt або Ag» № М/362–2012 від 20.05.2012 р. між СумДУ та Університетом Барода (м. Вадодара, Індія) (2013–2014 рр.), а також у рамках державної програми МОН України «Навчання студентів і аспірантів та стажування наукових і науково-педагогічних працівників у провідних вищих навчальних закладах та наукових установах за кордоном» згідно з договором між Сумським державним університетом та

Інститутом фізики Університету ім. Й. Гутенберга (м. Майнц, Німеччина) в 2011–2012 рр.

Дисертант брав участь у виконанні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень та під час підготовки проміжних і заключних звітів.

Мета і завдання досліджень. Мета дисертаційної роботи полягала у встановленні загальних закономірностей в електрофізичних, магніторезистивних та магнітооптичних властивостях плівкових систем на основі Fe, Ni та Ag або Au в умовах розмірних і концентраційних ефектів.

Відповідно до поставленої мети необхідно було вирішити такі технологічні та наукові завдання:

– дослідження впливу методу та умов осадження, термообробки, товщини шарів (концентрації атомів окремих компонент) на структурно-фазовий стан плівок, отриманих методами пошарової або одночасної конденсації;

– встановлення відповідності між особливостями кристалічної структури і фазового складу плівкових систем на основі феромагнітного металу (Fe), сплаву на основі Fe і Ni (Pу) та благородних металів Ag або Au з їх фізичними властивостями з урахуванням методу отримання, умов конденсації та термообробки;

– проведення досліджень розмірних, температурних і концентраційних ефектів у МО, ТКО та КТ із точки зору практичного застосування плівкових систем на основі феромагнітних і благородних металів.

Об'єкт дослідження – процеси фазоутворення, розмірні й концентраційні ефекти в електрофізичних і магніторезистивних властивостях плівкових систем на основі Fe, Ni та Ag або Au.

Предмет дослідження – структурно-фазовий стан, електрофізичні, магніторезистивні та магнітооптичні властивості плівкових систем Fe/Ag, Fe/Au, Pу/Ag і (Fe + Ag), (Fe + Au) та (Pу + Ag).

Методи дослідження: одночасна та пошарова вакуумна конденсація металів термічним та електронно-променевим методами, просвічувальна електронна мікроскопія (ПЕМ) та електроннографія, енергодисперсійний рентгенівський мікроаналіз (РМА), високоточна резистометрія для вимірювання магнітоопору, ТКО та КТ із використанням автоматизованих систем управління експериментом, вимірювання МОКЕ під час дослідження магнітооптичних та магнітних властивостей.

Наукова новизна одержаних результатів. Проведені в роботі комплексні дослідження взаємозв'язку кристалічної структури, фазового складу та електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей функціональних плівкових матеріалів на основі Fe, сплаву Pу та Ag або Au дозволили одержати такі нові наукові результати:

1. Уперше встановлено, що в плівкових системах на основі Fe і Ag або Au, отриманих методом одночасної конденсації металів, уже на стадії конденсації відбувається формування непорядкованих обмежених твердих розчинів: в системі (Fe + Ag)/П (П-підкладка) тверді розчини формуються на основі ГЦК ґратки Ag; в системі (Fe + Au)/П залежно від концентрації атомів Fe

стабілізується ГЦК т. р. Au(Fe) ($c_{\text{Fe}} < 55$ ат.%) та квазіаморфний або ОЦК т. р. α -Fe(Au) ($c_{\text{Fe}} = 65\text{--}85$ ат.%).

2. Уперше показано, що при заміні шару Fe на шар феромагнітного сплаву пермалою в системах на основі Ru і Ag відбувається істотне зростання диференціального коефіцієнта поздовжньої тензочутливості до 20–60 одиниць, а фазовий склад плівок відповідає ГЦК-Ni₃Fe + ГЦК-Ag як після конденсації, так і після відпалювання до 700 К.

3. Установлено, що для плівок на основі Fe і Au, сформованих методом одночасної конденсації, при $c \cong 45$ ат.% Au відбувається перехід з ізотропного МО з ознаками ГМО до анізотропного МО, що пов'язано із структурним переходом т. р. Au(Fe) \rightarrow т. р. α -Fe(Au).

4. Уперше одержані концентраційні залежності ТКО та МО, які показали, що максимальні значення МО (1,5–2,5%) та мінімальні - ТКО $(0,8\text{--}1,0) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ спостерігаються при концентрації атомів благородного металу від 65 до 70 ат.%, що говорить про можливість практичного застосування таких плівкових матеріалів, як температурно-стабільних функціональних елементів сенсорів магнітного поля.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані експериментальні результати досліджень поглиблюють розуміння впливу процесів фазоутворення на величину і стабільність робочих характеристик плівкових систем як елементів мікроелектронних і сенсорних приладів. Удосконалено методику отримання твердих розчинів методом одночасної конденсації з подальшою термічною обробкою, що дало можливість одержати стабільні робочі характеристики функціональних плівкових матеріалів на основі феромагнітних і благородних металів. Крім того, результати досліджень магніторезистивних і магнітооптичних властивостей плівок дали можливість визначити оптимальну концентрацію однієї з компонент та загальну товщину системи для використання їх як високоефективних чутливих елементів сенсорів магнітного поля, температури і деформації.

Особистий внесок здобувача полягає в самостійному пошуку і аналізі літературних джерел, проведенні наукових досліджень. Автор особисто отримував зразки, проводив дослідження структурно-фазового стану, електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей, оброблення та інтерпретацію одержаних результатів. Посталення завдань досліджень та узагальнення результатів виконані разом із науковим керівником д-ром фіз.-мат. наук, проф. Л.В. Одноворець. В обговоренні результатів досліджень брали участь проф. І.Ю. Проценко, доц. І.В. Чешко та доц. І.М. Пазуха. Усі наукові положення і висновки, винесені на захист, належать авторів дисертації.

У праці [1] здобувач провів вимірювання магнітоопору та електрофізичних властивостей плівок на основі пермалою та срібла. Текст статті підготовлено у співавторстві.

У праці [2] здобувач виміряв терморезистивні властивості плівкових систем на основі пермалою та срібла. Текст статті підготовлено у співавторстві.

У праці [3] здобувач одержав концентраційні залежності коефіцієнта тензочутливості плівок на основі Fe і Au та провів їх аналіз з урахуванням особливостей кристалічної структури та їх фазового складу. Текст статті підготовлено у співавторстві.

У праці [4] здобувач вимірював магнітоопір плівкового сплаву $Ni_{80}Fe_{20}$ та проаналізував польові залежності магнітоопору. Текст статті підготовлено автором особисто.

У праці [5] здобувач отримав і проаналізував експериментальні дані для магнітних властивостей плівок пермалою. Текст статті підготовлено у співавторстві.

У праці [6] проведено спільні дослідження фазового складу та електрофізичних властивостей плівок заліза. Текст статті підготовлено у співавторстві.

Праця [7] присвячена дослідженню фазового складу і терморезистивних властивостей плівкових систем на основі Fe і Ag або Ge. Зокрема, автор провів вимірювання температурного коефіцієнта опору плівок Ag/Fe. Текст статті підготовлено в співавторстві.

У праці [8] проведено дослідження намагніченості окремих частинок пермалою. Одержані криві намагніченості залежно від напрямку дії магнітного поля для частинок різної форми і розмірів. Текст статті здобувач підготував особисто.

Основні наукові результати автор доповідав особисто на наукових семінарах і конференціях [9-20]. Усі наукові положення і висновки, що винесені на захист, належать авторів дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: Міжнародній науково-технічній конференції «СЕМСТ-7» (м. Одеса, 2016 р.); Міжрегіональній науково-практичній конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики» (м. Суми, 2014 р.); науково-технічних конференціях «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2011, 2013–2017 рр.); Міжнародній конференції студентів і молодих науковців із теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (м. Львів, 2012 р.); Міжнародній конференції «Clusters and Nanostructured Materials» (м. Ужгород, 2012 р.); Міжнародній конференції «Nanomaterials: Applications and Properties» (м. Алушта, 2012 р.); 5-й Міжнародній науковій конференції «Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- і наноструктур» (м. Харків, 2011 р.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 20 працях, з яких 8 статей, зокрема 6 статей, що обліковуються наукометричною базою Scopus та належать до фахових видань України, і 12 тез доповідей.

Обсяг і структура дисертації. Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел із 151 найменування на 20 сторінках. Дисертацію викладено на 179 сторінках, з яких 113 сторінок основного тексту; робота містить 79 рисунків і 11 таблиць, зокрема, 55 рисунків і 10 таблиць на 40 окремих аркушах.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, відзначений зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовані мета й основні завдання дослідження, висвітлені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, наведена інформація про особистий внесок здобувача, апробацію одержаних результатів, структуру і зміст дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Функціональні плівкові матеріали на основі магнітних і благородних металів (літературний огляд)» наведений огляд літературних даних щодо накопичених результатів дослідження фазоутворення та електромеханічних, терморезистивних властивостей плівкових матеріалів на основі магнітних і благородних металів.

Перший підрозділ містить узагальнені дані стосовно кристалічної структури і фазоутворення тонких плівок на основі магнітних і благородних металів. Розглянуті температурні й концентраційні залежності параметра ґратки та середнього розміру зерна залежно від методу їх формування. Підкреслено, що маловивченими залишаються механізми та умови утворення т. р. і гранульованих плівкових сплавів на основі магнітних і благородних металів.

У *другому підрозділі* систематизовано особливості тензорезистивних властивостей одношарових плівок Fe, Ni_xFe_{1-x}, Ag та Au. Проаналізовано механічні властивості плівкових сплавів Fe_xAg_{1-x}. Проведено аналіз літературних даних щодо температурної залежності електричного опору функціональних матеріалів, досліджуваних у роботі.

У *третьому підрозділі* розглянуто особливості магніторезистивних властивостей плівкових матеріалів на основі магнітних і благородних металів.

У **другому розділі** «Методика формування зразків і проведення експериментальних досліджень» описані методи одержання та дослідження електрофізичних, магніторезистивних і магнітооптичних властивостей плівкових зразків на основі Fe, Ni та Ag або Au, а також їх структурно-фазового стану. У *першому підрозділі* описано обладнання для формування дво- і трикомпонентних плівкових систем методами пошарової та одночасної конденсації одержання тонких плівок. Конденсація плівкових зразків відбувалася в вакуумній камері за тиску газів залишкової атмосфери $p \cong 10^{-4}$ Па (окремі експерименти були проведені у високовакуумній камері Saburn MDC Europe за $p \cong 10^{-7}$ Па) на різні підкладки. Швидкість випаровування металів становила приблизно 0,15 нм/с. Товщину осадженого металу контролювали «in situ» методом кварцового резонатора.

У *другому підрозділі* описано методику дослідження температурної залежності питомого опору, термічного коефіцієнта опору та коефіцієнта тензочутливості. Термообробку зразків проводили впродовж декількох циклів «нагрівання ↔ охолодження» в автоматизованому режимі, що дозволяло здійснювати контроль швидкості нагрівання/охолодження зразків, проводити запис та оброблення експериментальних даних. Терморезистивні властивості досліджували впродовж трьох деформаційних циклів «навантаження ↔ зняття навантаження» в деформаційних інтервалах $\Delta\epsilon_1 = 0-1$ % та $\Delta\epsilon_2 = 1-2$ %.

У *третьому підрозділі* описано методику дослідження магніторезистивних та магнітооптичних властивостей. Вимірювання проводили в автоматизованому режимі за допомогою автоматизованого комплексу, що складається з електромагніту, уніполярного блока живлення електромагніту Philips PM 2811, мультиметра для вимірювання опору Keithley2000 Digital, 12-бітного АЦП-ЦАП NI USB 6008. Магнітооптичний ефект Керра (МОКЕ) досліджували з використанням установки, розміщеної в Інституті фізики університету ім. Й. Гуттенберга (м. Майнц, Німеччина). Дослідження магнітних характеристик виконане за допомогою вібраційного магнітометра VSM-7312 (фірма «Lake Shore Cryotronics, Inc.», США), що дає можливість вимірювати магнітний момент доменів, визначати його кутові залежності в широкому діапазоні полів і температур.

Четвертий підрозділ присвячений викладенню методики дослідження фазового складу і кристалічної структури тонких плівок. Електроннографічні та електронно-мікроскопічні дослідження проводили на просвічувальному електронному мікроскопі ПЕМ-125К. Для аналізу фазового складу плівок за результатами електроннографічних досліджень ми використали програмне забезпечення в середовищі LabVIEW. Використання сканувального електронного мікроскопа JSM-6400 з детектором аналізу спектру рентгенівського випромінювання DX3000 Detector Power Supply дозволило проконтролювати наявність домішок у зразках та визначити концентрацію атомів окремих компонент.

У **третьому розділі** «Кристалічна структура і фазовий склад плівкових систем на основі феромагнітних і благородних металів» наведені результати експериментальних досліджень структури та фазоутворення у свіжосконденсованих і термостабілізованих плівкових системах.

У *першому підрозділі* наведені результати вивчення мікроструктури та фазового складу одношарових плівок Fe, Ni, Ag та Au. Аналіз ширини та інтенсивності ліній на електроннограмах до та після відпалювання до 750, 900 і 1 100 К засвідчує, що із зростанням температури відпалювання ширина ліній на дифракційних картинах стає вужчою, при цьому на самих кільцях виникають додаткові точкові рефлекси, що свідчить про збільшення розміру зерен (областей когерентного розсіювання) в процесі термообробки.

Показано, що в плівках Fe, які сконденсувалися на підкладки за кімнатної температури (рис. 1 а, б), у разі зростання товщини плівки від 10 до 30 нм середній розмір зерна L збільшувався від 5 до 20 нм. При конденсації на підігріті підкладки розмір кристалітів збільшувався до 25–30 (рис. 1 в, г), це пояснюється підвищенням рухливості атомів, які абсорбуються, та зміною характеру перебігу дифузійних процесів, що призводить до зменшення площі меж зерен та дії внутрішніх макронапружень. Температура хімічного переходу $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4$ у разі зростання товщини плівки Fe від 10 до 100 нм збільшується від 550 до 720 К.

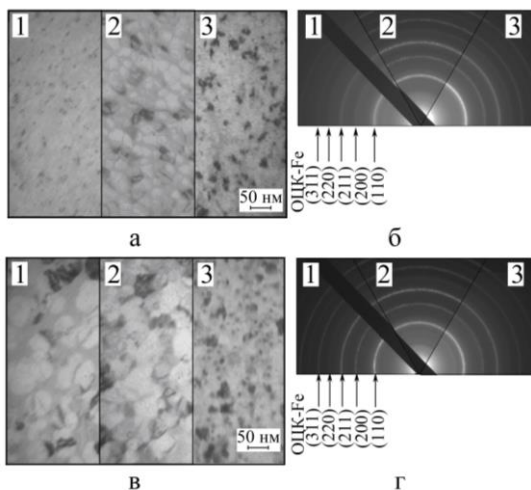
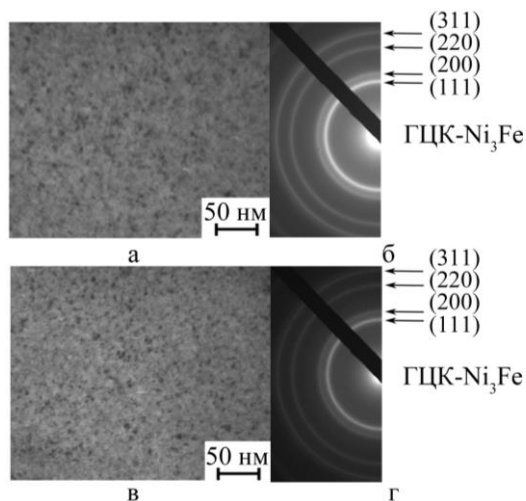


Рисунок 1 – Кристалічна будова (а, в), дифракційні картини (б, г) від плівок Fe, осаджених за температури підкладки $T_p = 300$ (а, б) та 500 К (в, г). Товщина зразків, нм: 10 (1), 30 (2) та 50 (3)

Під час формування багат шарових плівок функціональних елементів альтернативною шару Fe може стати шар феромагнітного сплаву пермалою $Ni_{80}Fe_{20}$ (Ru). Інтервал досліджуваних товщин плівок пермалою, як і для одношарових плівок Fe, становив 5–50 нм. На рисунку 2 наведені типові для плівок Ru дифракційні картини і мікроснімки кристалічної структури після конденсації та відпалювання до 500 К. Установлено, що плівки Ru у вихідному стані мають ГЦК-гратку з параметром $a = 0,3541$ нм, близьким до параметра інтерметалідної фази



Ni_3Fe ($a = 0,3550$ нм), та дрібнодисперсну лабіринтну структуру із середнім розміром зерна 5–10 нм, який при відпалюванні збільшується до 30–50 нм.

Рисунок 2 – Кристалічна будова (а, в), дифракційні картини (б, г) від плівки $Ni_{80}Fe_{20}(20)/П$ після конденсації (а, б) та термо-відпалювання до 500 К (в, г)

Після термовідпалювання до 500 К фазовий склад залишається незмінним і відповідає ГЦК-Ni₃Fe з дещо збільшеним параметром ґратки $a = 0,3556$ нм. Формування оксидних фаз електронографічно не фіксується, що свідчить про достатньо високу чистоту отриманих зразків.

У *другому підрозділі* розглянуто особливості фазового складу та кристалічної структури плівок на основі Fe і Ag. У невідпаленому стані на електронограмах спостерігаються лінії, які належать ОЦК-ґратці Fe із параметром $\bar{a} = 0,2088$ нм, та ГЦК-ґратці Ag з $\bar{a} = 0,4086$ нм. Це свідчить про те, що в плівкових системах на основі Fe і Ag, сформованих методом пошарової конденсації, до великої міри зберігається індивідуальність окремих шарів. Аналізуючи дані розшифрування електронограм плівки Ag(30)/Fe(30)/П після відпалювання до 800 К необхідно зазначити, що в процесі термообробки відбувається незначне зменшення параметра ГЦК-ґратки ($a = 0,4083$ нм), в той час як параметр ОЦК-ґратки ($a = 0,2887$ нм) залишається незмінним порівняно з невідпаленим зразком. Це свідчить про те, що в системах, одержаних методом пошарової конденсації, в процесі термовідпалювання відбувається стабілізація розбавленого т. р. Ag(Fe) на основі ГЦК-ґратки.

Електронографічні дослідження плівкових матеріалів на основі Fe і Ag, сформованих методом одночасної конденсації компонент, свідчать про те, що незалежно від концентрації компонент та загальної товщини плівки в системі (Fe + Ag)/П відбувається формування ГЦК-гранульованого твердого розчину т. р. Ag(Fe) (рис. 3), що призводить до зменшення параметра ГЦК-ґратки ($\bar{a} = 0,402$ нм) порівняно з параметром ґратки для ГЦК-Ag ($\bar{a} = 0,4086$ нм), а на дифракційних картинах спостерігається накладання ліній (200), (220) і (222) від т. р. Ag(Fe) та ліній (110), (200) і (211) – від ОЦК-Fe, результатом цього є розширення дифракційних кілець на електронограмах (рис. 3 а). У процесі термовідпалювання до 750 К змін у фазовому стані зразків не відбувалося. Спостерігалось лише зростання параметра ГЦК-ґратки т. р. Ag(Fe).

Дифракційні та електронно-мікроскопічні дослідження (рис. 3) кристалічної структури і фазового складу плівок на основі Fe і Au, сформованих методом одночасної конденсації компонент, свідчать про те, що в зразках товщиною 20 – 40 нм після конденсації металів у концентраційному інтервалі $c_{Au} = 15-45$ ат.% формується квазіаморфний або ОЦК т. р. α -Fe(Au), при $c_{Au} > 45$ ат.% – ГЦК т. р. Au(Fe). При цьому параметр ґратки т. р. спочатку зменшується, а потім зростає і має величину 0,3014 нм ($c_{Au} = 20$ ат.%), 0,2968 нм ($c_{Au} = 35$ ат.%) та 0,4023 нм ($c_{Au} = 55$ ат.%).

У *третьому підрозділі* наведені результати досліджень фазового складу плівкових систем на основі пермалою та срібла. Установлено, що в системі (Pу + Ag)/П після конденсації фіксується двофазовий склад ГЦК-Ni₃Fe + ГЦК-Ag із параметрами ґраток $a(\text{ГЦК-Ni}_3\text{Fe}) = 0,3532$ нм та $a(\text{ГЦК-Ag}) = 0,4075$ нм. Термообробка до 700 К практично не впливає на кристалічну структуру плівок (розміри кристалітів 2–5 нм).

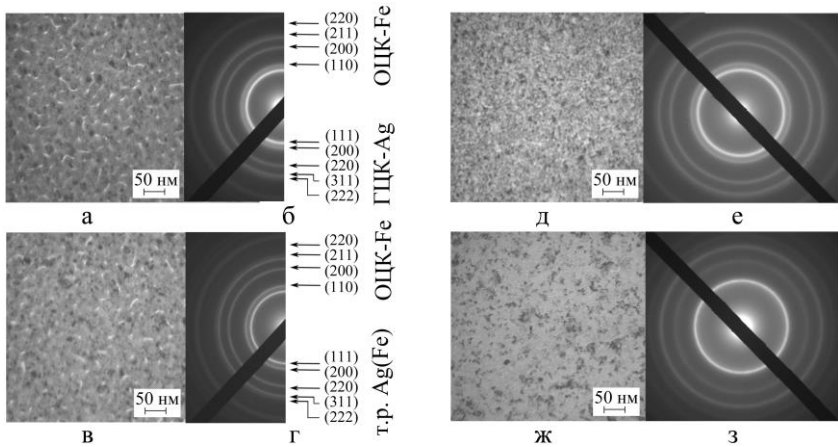


Рисунок 3 – Кристалічна будова (а, в, д, ж), дифракційні картини (б, г, е, з) для плівкової системи (Fe + Ag)/П за $c_{Ag} = 70$ ат.%, до (а, б) та після термовідпалювання до $T = 750$ К (в, г) (ліва частина) і для плівкової системи (Fe + Au)/П із концентраціями $c_{Au} = 60$ (д, е) та 20 ат.% (з, ж) (права частина)

У *четвертому підрозділі* наведені результати досліджень елементного складу методом енергодисперсійного аналізу. Експериментальні та одержані розрахунковим методом результати для плівкових систем (Fe + Ag)/П, (Fe + Au)/П та (Ru + Ag)/П добре узгоджуються (± 3 ат.%).

У **четвертому розділі** «Магніторезистивні та магнітооптичні властивості плівкових матеріалів на основі феромагнітних і благородних металів» наведені результати експериментальних досліджень розмірних і концентраційних ефектів у магнітоопорах плівкових систем на основі Fe або Ru і Ag або Au.

У *першому підрозділі* проведено аналіз особливостей магніторезистивних та магнітооптичних властивостей плівкових систем на основі Fe і Ag, отриманих методом пошарової конденсації, з метою можливості формування функціонального шару Fe для чутливих елементів приладів із керованими магніторезистивними та магнітними властивостями. На основі розмірних залежностей $H_c(d_{Fe})$ і $MO(d_{Fe})$ для систем з ультратонкими шарами Ag(4)/Fe(d_{Fe})/Ag(4)/П та Ag(5)/Fe(d_{Fe})/Ag(5)/П (рис. 4 в, г) було встановлено, що зростання величини MO відбувається лише в разі, якщо ефективна товщина шару заліза $d_{Fe} > 6$ нм, а збільшення MO – лише за ефективної товщини $d_{Fe} \geq d_{Ag1}, d_{Ag2}$.

Порівняльний аналіз магнітних властивостей плівкових систем Fe(3)/Ag(d_{Ag1})/П (при $d_{Ag1} = 1-5$ нм) та Ag(d_{Ag2})/Fe(3)/Ag(d_{Ag1})/П (при $d_{Ag} = d_{Ag1} + d_{Ag2} = 6$ нм) (рис. 4 а, б) показав наступне. По-перше, нанесення і поступове збільшення товщини немагнітного прошарку Ag від 1 до 5 нм за фіксованої товщини феромагнітного шару приводить до збільшення коерцитивної сили від 5 до 15 мТл, що пояснюється переходом частинок Fe в шар Ag і формуванням функціонального шару Fe, який складається з феромагнітних частинок, розміщених одна від одної на відстані, близькій до розміру частинки.

У другому підрозділі описано розмірні й концентраційні ефекти в магнітоопорі плівкових систем $(\text{Fe} + \text{Ag})/\text{П}$ та $(\text{Fe} + \text{Au})/\text{П}$, отриманих методом одночасної конденсації компонент. Дослідження магніторезистивних властивостей плівок здійснювали в інтервалі концентрацій немагнітної компоненти 10–90 ат. %.

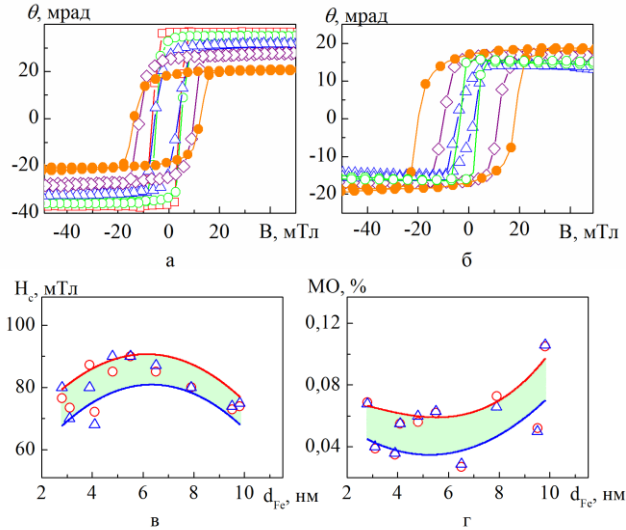


Рисунок 4 – Польові залежності МОКЕ-сигналу для систем $\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{Ag}(d_{\text{Ag1}})/\text{П}$ (а) і $\text{Ag}(d_{\text{Ag2}})/\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{Ag}(d_{\text{Ag1}})/\text{П}$ (б) при $d_{\text{Fe}} = 3$ нм. та розмірні залежності величини коерцитивної сили (в) і магнітоопору (г) для системи $\text{Ag}(5)/\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{Ag}(5)/\text{П}$ для поздовжньої ($-\circ-$) та поперечної ($-\Delta-$) геометрій вимірювання. Товщина d_{Ag1} : (\bullet) – 5 нм, (\diamond) – 3 нм, (Δ) – 2 нм, (\circ) – 1 нм та (\square) – 0; $d_{\text{Ag1}} + d_{\text{Ag2}} = 6$ нм

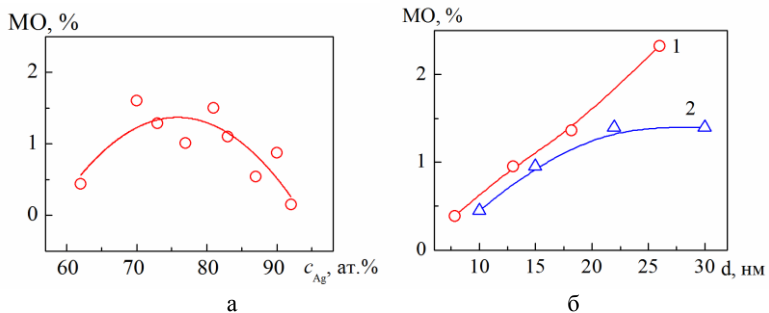


Рисунок 5 – Залежність величини МО для плівкових систем $(\text{Fe} + \text{Ag})/\text{П}$ від концентрації атомів Ag (а) і розмірна залежність величини МО за $c_{\text{Ag}} = 70$ (1) та 80 ат. % (2) (б)

Польові залежності магнітопопу $MO(B)$ мають ізотропний характер у площині зразка для всіх товщин, а в перпендикулярній геометрії відбуваються зменшення амплітуди ефекту та зміна форми магніторезистивної петлі. Як бачимо з рисунків 5 і 6, у свіжосконденсованих плівкових системах товщиною 10–40 нм максимальні значення $MO = 1,5\text{--}2,5\%$ (плівки $(Fe + Ag)/Pi$) або $0,2\text{--}0,3\%$ (плівки $(Fe + Au)/Pi$) спостерігаються при концентраціях немагнітної компоненти від 65 до 70 ат.% (для систем на основі Fe і Au в цьому концентраційному інтервалі відбувається структурний перехід т. р. $Au(Fe) \rightarrow$ т. р. $\alpha\text{-Fe}(Au)$). Поряд із цим поведінка MO в інтервалі полів $(-40\text{ мТл})\text{--}(+40\text{ мТл})$ для двох геометрій у площині зразка має інверсний характер, що свідчить про виникнення АМО, величина якого не перевищує $0,05\%$, та не впливає на загальну величину MO .

У *третьому підрозділі* наведені результати впливу режиму термообробки зразків на величину MO плівкових матеріалів на основі Fe та Ag або Au. У системах $(Fe + Ag)/Pi$ у процесі термовідпалювання спостерігається зменшення величини MO з $2,5\%$ – при 300 К до $0,30\text{--}0,5\%$ – при 750 К (рис. 7 а). Подальше збільшення температури відпалювання (до 900 та 1100 К) не приводить до істотних змін величини MO . Це пов'язано з тим, що за температури 750 К завершуються рекристалізаційні процеси і за $T_b > 750\text{ К}$ не відбувається змін ні в кристалічній, ні в доменній структурах зразка.

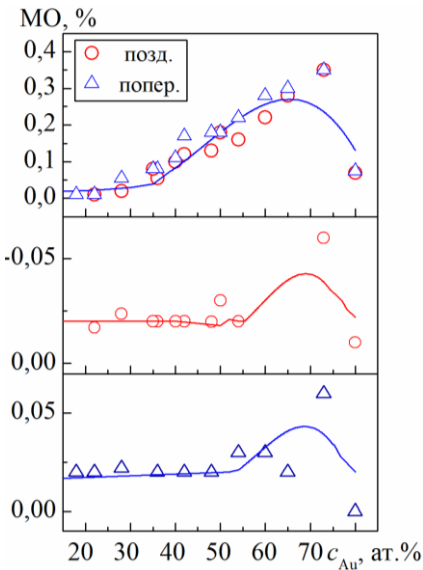


Рисунок 6 – Концентраційні залежності MO для системи $(Fe + Au)/Pi$

Для свіжосконденсованих плівок $(Fe + Au)/Pi$ на концентраційних залежностях MO спостерігається максимум за $c_{Au} = 70\text{ ат.}\%$. Процес термовідпалювання до 450 та 550 К фактично не змінює величини MO і характер його концентраційної залежності. За $T_b = 750\text{ К}$ відбувається зміщення максимуму в бік більших концентрацій (рис. 7 б), а максимальна амплітуда ефекту $0,32\%$ спостерігається при $c_{Au} = 60\text{ ат.}\%$. Зазначимо, що MO для систем $(Fe + Au)/Pi$ із концентрацією $c_{Au} \leq 60\text{ ат.}\%$ має більшу величину після відпалювання до 750 К порівняно з MO цих плівок у концентраційному інтервалі $c_{Au} \geq 60\text{ ат.}\%$.

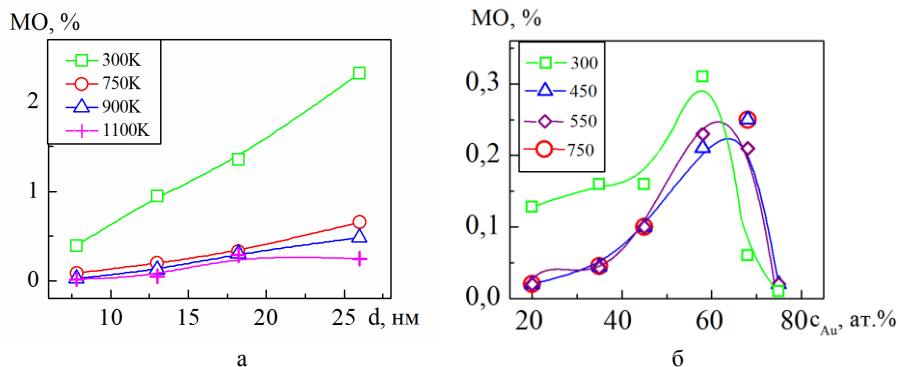


Рисунок 7 – Залежність величини МО для систем (Fe+Ag)/П при концентрації атомів $c_{Ag}=70$ ат.%, від загальної товщини системи при різних температурах відпалювання (а) та (Fe+Au)/П для різних температур відпалювання (б)

Результати досліджень магніторезистивних властивостей пліткових систем на основі Pu і Ag наведені в *четвертому підрозділі*. Польові залежності МО одношарових плівок пермалою характеризуються анізотропією при переході до перпендикулярної орієнтації магнітного поля відносно напрямку проходження струму та малим значенням коерцитивної сили в поперечній і поздовжній геометріях, що є характерним для магнітом'яких матеріалів, до яких належить і пермалой. Дослідження магнітних властивостей тонких фольг $Ni_{80}Fe_{20}$ товщиною 30 нм показали, що форма петель магнітного гістерезису та величина коерцитивності істотно залежать від геометричних розмірів зразка за постійної товщини. Зміна розмірів плівки з 350×7 до 7×70 мкм супроводжується змінами кута нахилу залежності $AMO(B)$ та відповідним зменшенням величини коерцитивної сили B_c приблизно в двічі (рис. 8), оскільки структура зразка складається з ансамблю магнітних кластерів, випадковим чином розподілених у немагнітній матриці.

Одержано, що в плівках $(Pu + Ag)/P$ при зростанні концентрації атомів срібла від 10 до 55 ат.% характер польових залежностей залишається ізотропним, а величина МО збільшується з 0,1 до 0,6 % (рис.9). Подальше збільшення концентрації c_{Ag} призводить до поступового зменшення МО, і за $c_{Ag} = 80$ ат.%, його величина знов не перевищує 0,1 %. Це пов'язано з тим, що кількість ізольованих магнітних кластерів істотно зменшується, а властивості системи $(Pu + Ag)/P$ стають близькими до властивостей феромагнітної плівки з легкою віссю намагнічування. Установлено, що як у вихідному стані, так і після відпалювання до 500 К польові залежності у діапазоні магнітних полів від 0 до ± 500 мТл не виходять на насичення, а більш істотні зміни відбувається після термовідпалювання плівок $(Pu + Ag)/P$ до 600 К.

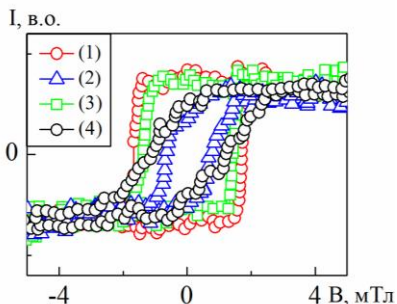


Рисунок 8 – Петлі магнітного гістерезису для стрічок пермалою $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ товщиною 30 нм та розміром 350×7 мкм (1), 20×10 мкм (2), 10×40 мкм (3) і 7×70 мкм (4) при куті повороту зразка $\alpha = 0^\circ$

Це стосується як форми польових залежностей, так і величини МО: у перпендикулярній геометрії зникають подвійні максимуми; починає виявлятися анізотропія в площині зразка; за $c_{\text{Ag}} = 63 - 65$ ат.% у поздовжній і поперечній геометріях спостерігається гістерезисна поведінка польових залежностей МО ($B_c = 15$ мТл) з виходом на насичення при $B_s = 50$ мТл, що є типовим для плівок феромагнітних металів.

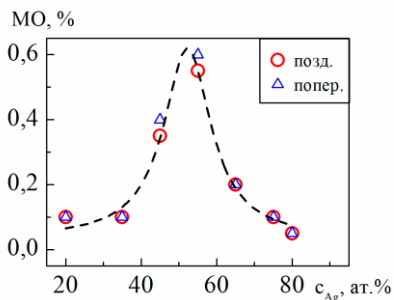


Рисунок 9 – Концентраційна залежність МО плівкової системи $(\text{Ru}+\text{Ag})/\text{П}$ загальною товщиною 30 нм після конденсації

П'ятий розділ «Електрофізичні властивості плівкових систем на основі феромагнітних і благородних металів» складається з двох підрозділів.

Перший підрозділ присвячений вивченню терморезистивних властивостей. Узагальнені розмірні залежності питомого опору і термічного коефіцієнта опору для плівок Fe, Ag та Au подані на рисунку 10. Результати досліджень терморезистивних властивостей вказують на те, що температурна залежність питомого опору ($\sim 10^{-7}$ Ом·м) для систем $(\text{Fe} + \text{Ag})/\text{П}$ та $(\text{Fe} + \text{Au})/\text{П}$ в температурному інтервалі 300–600 К за концентрації атомів немагнітної компоненти 65–70 ат.% на 1-му або 2-му циклі «нагрівання \leftrightarrow охолодження» має лінійний характер, а величина ТКО дорівнює: $(1-3) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ – для плівок $(\text{Fe} + \text{Ag})/\text{П}$ та $(\text{Fe} + \text{Au})/\text{П}$ і $(2-6) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ – для систем $(\text{Ru} + \text{Ag})/\text{П}$.

Розмірні експериментальні залежності $\rho(d)$ і $\beta(d)$ якісно відповідають співвідношенням (1) і (2) класичної теорії Фукса – Зондгеймера:

$$\frac{\rho}{\rho_{\infty}} \cong 1 + \frac{3}{8} \cdot \frac{\lambda_0(1-p)}{d}, \quad (1)$$

$$\frac{\beta}{\beta_{\infty}} \cong 1 - \frac{3}{8} \cdot \frac{\lambda_0(1-p)}{d} \quad (2)$$

для випадку $d/\lambda_0 > 1$ і $p < 1$, де λ_0 – середня довжина вільного пробігу електронів у масивних зразках; p – коефіцієнт дзеркальності; $\rho_{\infty} \cong \lim_{d \rightarrow \infty} \rho$ і $\beta_{\infty} \cong \lim_{d \rightarrow \infty} \beta$.

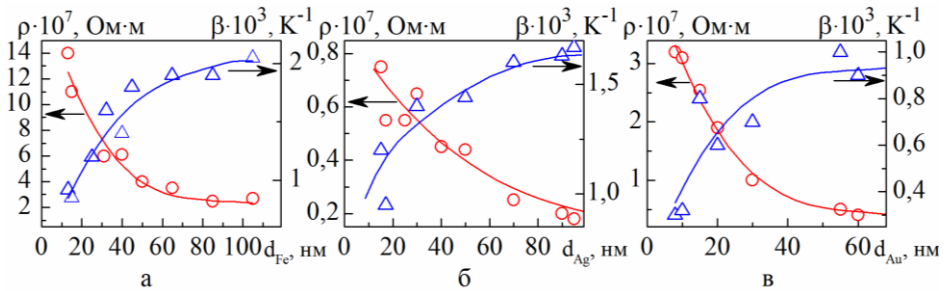


Рисунок 10 – Розмірні залежності величини питомого опору ρ і температурного коефіцієнта опору β для плівок Fe (а), Ag (б) та Au (в)

Краща відповідність експериментальних і розрахункових результатів має місце у випадку моделі ефективної довжини вільного пробігу:

$$\frac{\rho}{\rho_0} \cong \left[1 + \frac{3}{8} \cdot \frac{\lambda_g(1-p)}{d} \right] \cdot f(\alpha)^{-1} = \left[f(\alpha)^{-1} + \frac{3}{8} \cdot \frac{\lambda_0(1-p)}{d} \right], \quad \rho_g = \frac{\rho_0}{f(\alpha)}, \quad (3)$$

де ρ_g – питомий опір плівки, обумовлений розсіюванням носіїв електричного струму на фонах і межах кристалічних зерен; $\lambda_g = \lambda_0 \cdot f(\alpha)$ – середня довжина вільного пробігу електронів, лімітована межами зерен; $f(\alpha)$ – функція зерномежового розсіювання електронів; $\alpha = \frac{\lambda_0}{L} \cdot \frac{R}{1-R}$ – параметр

зерномежового розсіювання та R – коефіцієнт розсіювання носіїв електричного струму на межі зерен.

Для ТКО можна записати аналогічне співвідношення:

$$\frac{\beta}{\beta_0} \cong \left[1 + \frac{3}{8} \cdot \frac{\lambda_g(1-p)}{d} \right]^{-1} \cdot f(\alpha). \quad (4)$$

Аналізуючи питання про концентраційну залежність питомого опору двохшарових плівок, ми виходили з модельних уявлень, які узгоджуються з

експериментальними даними:

– дифузія чужорідних атомів відбувається як в об'ємі зерна, так і на його межі, але на величину коефіцієнта розсіювання носіїв електричного струму впливає лише другий тип дифузії;

– коефіцієнт розсіювання носіїв електричного струму на межі зерна за невеликих концентрацій змінюється прямо пропорційно концентрації домішкових атомів.

Для підтвердження того факту, що в системах відбувається утворення твердих розчинів, були проведені розрахунки величини ТКО за співвідношенням для випадку, коли в системі відбувається повне перемішування компонент з утворенням плівкового сплаву:

$$\beta \cong \frac{\beta_{Fe}}{1 + \frac{c_{Ag(Au)}\rho_{Ag(Au)}}{c_{Fe}\rho_{Fe}}} + \frac{\beta_{Ag(Au)}}{1 + \frac{c_{Fe}\rho_{Fe}}{c_{Ag(Au)}\rho_{Ag(Au)}}}$$

Порівняння експериментальних величин ТКО для систем (Fe + Ag)/П та (Fe + Au)/П із розрахунковими за цим співвідношенням мають задовільну якісну відповідність для діапазону концентрацій, де залежність $\beta(c_{Au})$ має близький до лінійного характер. Узагальнені концентраційні залежності питомого опору та ТКО для систем (Fe + Ag)/П та (Fe + Au)/П загальною товщиною 20 нм подані на рисунку 11, із якого видно, що залежності носять нелінійний характер із слабвираженими максимумами і мінімумами.

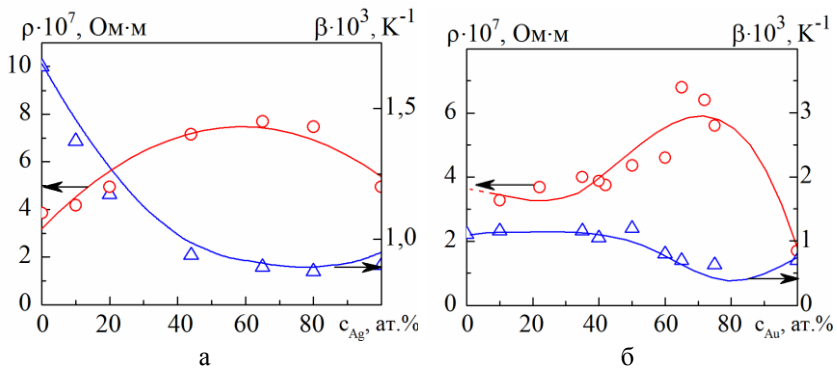


Рисунок 11 – Концентраційні залежності величини питомого опору і ТКО для плівкових систем (Fe + Ag)/П (а) та (Fe + Au)/П (б) загальною товщиною 20 нм

Другий підрозділ присвячений дослідженню тензорезистивного ефекту в плівкових системах на основі Fe або Ru і Ag або Au. Аналіз одержаних даних дозволяє зробити висновок про те, що в тензорезистивних властивостях плівкових матеріалів певну роль повинні відігравати не лише структурні зміни, які відбуваються в зразку при деформації, а й концентраційний ефект.

Кількісною характеристикою тензорезистивного ефекту є коефіцієнт поздовжньої $(\gamma_l)_{\text{int}}$ тензочутливості. Згідно з визначенням

$$(\gamma_l)_{\text{int}} = \frac{dR}{R_n \cdot d\varepsilon_l} = \frac{d\rho}{\rho_n \cdot d\varepsilon_l} + (1 + 2\mu_f), \quad (5)$$

де індекс «n» позначає початкове (до деформації) значення опору та питомого опору; μ_f – коефіцієнт Пуассона для півки.

Співвідношення (5) можна перетворити до вигляду

$$(\gamma_l)_{\text{int}} = 1 + \eta_{\lambda_0} + (1 + 2\mu_f), \quad (6)$$

де $\eta_{\lambda_0} = -\frac{d\lambda_0}{\lambda_0 d\varepsilon_l}$ – деформаційний коефіцієнт середньої довжини вільного

пробігу носіїв електричного струму.

Із співвідношень (5) і (6) витікає, що розмірна і концентраційна залежності величини $(\gamma_l)_{\text{int}}$ повністю визначаються величиною деформаційного коефіцієнта, оскільки λ_0 залежить і від товщини зразка, і від концентрації компонент, а геометричний фактор $(1 + 2\mu_f) \cong 1,6$ не залежить від цих параметрів, що підтверджується експериментальними результатами.

Концентраційні залежності інтегрального КТ для систем (Fe + Ag)/П, (Fe + Au)/П та (Pу + Ag)/П, отриманих методом одночасної конденсації компонент, в інтервалах пружної (1) та пластичної деформації (2) показані на рисунку 12.

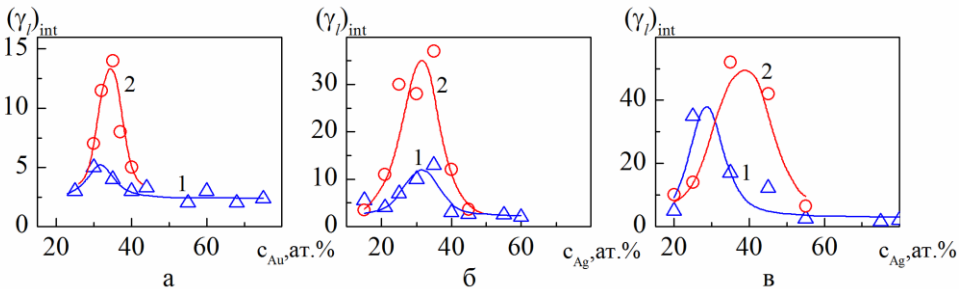


Рисунок 12 – Концентраційні залежності інтегрального коефіцієнта тензочутливості для півкових систем (Fe + Au)/П (а), (Fe + Ag)/П (б) та (Pу + Ag)/П (в) у діапазоні пружної (1) і пластичної деформації (2)

Максимальна величина КТ в області пружної деформації $\Delta\varepsilon_1 = 0\text{--}1\%$ дорівнює 5 (Fe + Au/П), 12 (Fe + Ag/П) та 37 (Pу + Ag/П) одиниць і відповідно в області пластичної деформації $\Delta\varepsilon_2 = 1\text{--}2\%$: 14 (Fe + Au/П); 37 (Fe + Ag/П) і 50 (Pу + Ag/П) одиниць, що відповідає концентрації атомів благородних металів від 30 до 40 ат.%.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язана актуальна задача щодо проблеми фізики твердого тіла «Взаємозв'язок кристалічної структури і фізичних властивостей багатокомпонентних плівок» стосовно розмірних та концентраційних ефектів у електрофізичних і магніторезистивних властивостях гранульованих плівкових систем, одержаних методами одночасної й пошарової конденсації.

1. Дослідження структурно-фазового стану показало, що в плівкових системах на основі Fe і Ag або Au вже на стадії конденсації відбувається утворення неупорядкованих обмежених твердих розчинів:

– уперше встановлено, що в системах (Fe + Ag)/П тверді розчини формуються на основі ГЦК-ґратки Ag (параметр ґратки $a = 0,4083$ нм); у системах (Fe + Au)/П залежно від концентрації атомів Fe стабілізується ГЦК т. р. Au(Fe) ($c_{Au} > 45$ ат.%, $a = 0,4086$ нм) або квазіаморфний, або ОЦК т. р. α -Fe(Au) ($c_{Au} = 15\text{--}35$ ат.%, $a = 0,3014$ нм);

– заміна шару Fe на шар пермалою покращує температурну стабільність зразків (Ru + Ag)/П, одержаних методом одночасної конденсації компонент, про що свідчить їх незмінний двофазний склад (ГЦК-Ni₃Fe + ГЦК-Ag) як у вихідному стані, так і після термовідпалювання до 700 К.

2. На основі експериментальних досліджень магніторезистивних і магнітооптичних властивостей систем Ag/Fe/Ag/П ($d_{Fe/Ag} = 1\text{--}10$ нм), одержаних пошаровою конденсацією, встановлено:

– для формування функціонального шару (на основі острівцевої плівки Fe) чутливих елементів наноелектроніки з підвищеним значенням величини ізотропного магнітоопору МО оптимальна ефективна товщина шару Fe повинна складати 3 нм, а сумарна ефективна товщина шарів Ag – не менше ніж 6 нм;

– нанесення і поступове збільшення товщини верхнього шару Ag від 1 до 5 нм при фіксованій $d_{Fe} = 3$ нм приводить до зміни форми польових залежностей МОКЕ-сигналу та збільшення коерцитивної сили системи від 5 до 15 мТл.

3. Аналіз розмірних і концентраційних залежностей магнітоопору плівкових систем, отриманих методом одночасної конденсації металів, дозволило уперше встановити:

– у свіжосконденсованих системах товщиною 10–40 нм максимальні значення МО = 1,5–2,5% (плівки (Fe + Ag)/П) або 0,2–0,3 % (плівки (Fe + Au)/П) спостерігаються за концентрацій немагнітної компоненти від 65 до 70 ат.%;

– у плівках (Ru+Ag)/П зростання концентрації c_{Ag} від 10 до 52 ат.% приводить до збільшення величини МО від 0,1 до 0,6 % та його поступового зменшення до 0,1 за $c_{Ag} = 80$ ат.%, що пов'язано із зменшенням кількості ізольованих магнітних кластерів;

– для тонких фольг пермалою Ni₈₀Fe₂₀ товщиною 30–40 нм вивчена залежність форми петлі МОКЕ-сигналу від коефіцієнта форми (відношення довжини зразка до його ширини) та встановлено, що при зменшенні коефіцієнта форми від 50 до 0,1 кут нахилу петлі магнітного гістерезису змінюється, а

коерцитивна сила зменшується з 1,6 до 0,8 мТл;

– зростання середнього розміру гранул у т. р. Ag(Fe), який утворився після термовідпалювання до 900 К системи (Fe + Ag)/П, призводить до збільшення середньої відстані між гранулами α -Fe та різкого зменшення МО з 1,5–2,0 % до 0,30–0,75 % в діапазоні товщин 5–30 нм.

5. Дослідження терморезистивних властивостей показали, що температурна залежність питомого опору для систем (Fe + Ag)/П та (Fe + Au)/П в температурному інтервалі 300–600 К за концентрації атомів немагнітної компоненти 65–70 ат.% на 1-му або 2-му циклі «нагрівання \leftrightarrow охолодження» має лінійний характер, а величина ТКО: $(1-3) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ – для плівок (Fe + Ag)/П та (Fe + Au)/П і $(2-6) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ – для систем (Pv + Ag)/П.

6. Установлено, що на характер деформаційних залежностей та величину коефіцієнта поздовжньої тензочутливості (КТ) впливають не лише структурні зміни, які відбуваються в плівці при деформації, а й концентраційний ефект, що обумовлює зміну середньої довжини вільного пробігу електронів при їх розсіюванні на атомах магнітної компоненти. Показано, що величина інтегрального КТ в інтервалі концентрацій немагнітної компоненти 30–40 ат.% для плівкових систем на основі Fe і Ag та Fe і Au має значення 37 та 14 одиниць відповідно, а в системі (Pv + Ag)/П – від 40 до 50 одиниць.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Pазukha I.M. A comprehensive investigation of electrophysical and magnetoresistive properties of thin films based on permalloy and silver / I. M. Pазukha, **O. V. Pylypenko**, L. V. Odnodvoretz // Materials Research Express. – 2018. – V. 5, № 10. – P. 106409–106416.

2. Тензорезистивні властивості плівкових систем на основі пермалою та срібла / Д. О. Шуляренко, О. В. Пилипенко, К. В. Тищенко I. M. Пазуха, Л. В. Оdnодворець // Журнал нано- та електронної фізики. – 2018. – Т. 10, № 1. – С. 01010-1–01010-4.

3. The concentration anomaly of strain coefficient binary film system based on Au and Fe atoms / **O. V. Pylypenko**, L. V. Odnodvoretz, M. O. Shumakova, I. Yu. Protsenko // Problems of Atomic Science and Technology. – 2016. – №5 (105). – P. 131–135.

4. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівок сплаву $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ / **O. V. Пилипенко**, I. M. Пазуха, А. С. Овруцький, Л. В. Оdnодворець // Журнал нано- та електронної фізики. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 03022-1–03022-45.

5. Структурно-фазовий стан, магніторезистивні та магнітні властивості плівок пермалою / Я. М. Литвиненко, I. M. Пазуха, **O. V. Пилипенко**, В. В. Бібик // Металлофізика и новейшие технологии. – 2015. – Т. 37, № 10. – С. 1001–1017.

6. Фазовий склад та електрофізичні властивості плівок заліза / С.І. Воробйов, Л.В. Оdnодворець, **O. V. Пилипенко**, А.М. Черноус // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2012. – Т.10, №4. – С.829 – 840.

7. Власенко О. В. Фазовий склад і терморезистивні властивості плівкових систем на основі Ge/Fe і Ag/Fe / О. В. Власенко, **О. В. Пилипенко**, Л. В. Однорець, // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2012. – Т. 10, № 3. – С. 511–518.

8. Quadratic magneto-optical effects in two-dimensional permalloy particles investigated by scanning X-ray microscopy / S.A. Nepijko, **O.V. Pylypenko**, L.V. Odnodvoretz, E. Kisker, H.J. Elmers, G. Schönhense // Applied Physics A. – 2012. – V.111, №2. – P.557 – 561.

2. Наукові праці апробаційного характеру

9. Магніторезистивні властивості тришарових плівок Ni/Bi/Ni / П. С. Отич, Д. В. Подуремне, **О. В. Пилипенко**, С. І. Воробйов // Матеріали та програма науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка – 2017», м. Суми, 17–21 квітня 2017. – Суми : СумДУ, 2017 – С. 93.

10. Магніторезистивні властивості плівкових чутливих елементів сенсорів на основі Fe і Ag або Au / С. О. Волков, **О. В. Пилипенко**, О. П. Ткач, Л. В. Однорець // Матеріали та програма 7-мої Міжнародної науково-технічної конференції «СЕМСТ-7», м. Одеса, 30 травня – 3 червня, 2016 р. – Одеса, 2016. – С.123.

11. **Пилипенко О. В.** Кристалічна структура і фізичні властивості одношарових плівок на основі атомів Au і Fe. I. Фазовий склад / О. В. Пилипенко, Г. М. Положій, Л. В. Однорець // Матеріали та програма науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка – 2016», м. Суми, 18–22 квітня 2016. – Суми: СумДУ, 2016 – С. 171 – 172.

12. **Пилипенко О. В.** Кристалічна структура і фізичні властивості одношарових плівок на основі атомів Au і Fe. II. Тензорезистивні властивості / О. В. Пилипенко, Г. М. Положій, М. О. Шумакова // Матеріали та програма Науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка – 2016», м. Суми, 18–22 квітня 2016. – Суми: СумДУ, 2016 – С. 173.

13. **Пилипенко О. В.** Термо- і магніторезистивні властивості багатошарових плівок на основі Fe і Au / О. В. Пилипенко, С. О. Волков, А. М. Панюта // Матеріали та програма науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка – 2015», м. Суми, 20–25 квітня 2015. – Суми: СумДУ, 2015 – С. 116.

14. **Пилипенко О. В.** Контроль товщини методом кварцового резонатора при одночасній конденсації металів з двох джерел / О. В. Пилипенко, Л. В. Однорець // IV Міжрегіональної науково-практичної конференції молодих учених «Сучасні проблеми експериментальної та теоретичної фізики», м. Суми, 25–26 квітня 2014. – Суми: СумДПУ ім. А. С. Макаренка, 2014 – С. 112.

15. **Пилипенко О. В.** Магніторезистивні властивості гранульованих плівкових сплавів на основі Fe і Ag як чутливих елементів датчиків / О. В. Пилипенко, М. М. Корольов, Л. В. Однорець // Матеріали та програма науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка – 2013».

м. Суми, 22–27 квітня 2013. – Суми: СумДУ, 2013 – С. 128.

16. Electrophysical, magnetoresistivity and magneto-optical properties of multilayer materials based on nanocrystalline and amorphous films / S. Nepijko, L. V. Odnodvoret, O. V. Pylypenko, A. I. Saltykova, O. P. Tkach, O. V. Vlasenko // Матеріали Міжнародної конференції конференції «Nanomaterials: Application & Properties-2012». Alushta, Crimea 17–22 September 2012. – Sumy, 2012. – V. 1. – P. 03TF10(1) – 03TF10(4).

17. Magneto-optic properties of multilayer film systems with giant magnetoresistance / D. M. Kondrakhova, **O. V. Pylypenko**, Yu. M. Shabelnyk et al. // Book of abstracts of International Conference «CNM-3». Uzhhorod, 20–25 May, 2012. – Uzhhorod, 2012. – P. 54.

18. Magnetic properties of two-dimensional permalloy particles / S. A. Nepijko, L. V. Odnodvoret, **O. V. Pylypenko** et al. // Book of abstracts «International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics HEUREKA-2012». Lviv, 19–22 April. – Lviv, 2012. – P. D33.

19. Magnetic properties investigation of nanoparticles ensembles based on solid solutions with FePt oxide shell / I.O. Shpetnyi, Ya.M. Lytvynenko, **O.V. Pylypenko** et al. // Book of abstracts «International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics HEUREKA-2012». Lviv, 19–22 April. – Lviv, 2012. – P.E17.

20. **Пилипенко О. В.** Температурний коефіцієнт опору плівкових матеріалів на основі Fe і Ag / О.В. Пилипенко, Л.В. Однодворець, С.В. Чернов // Матеріали та програма Науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка – 2011». м. Суми, 18–22 квітня 2011. – Суми: СумДУ, 2011. – С. 103.

АНОТАЦІЯ

Пилипенко О. В. Електрофізичні та магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Fe, Ni та Ag або Au. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2019.

Дисертаційна робота присвячена встановленню загальних закономірностей у електрофізичних, магніторезистивних та магнітооптичних властивостях плівкових систем на основі Fe, Ni та Ag або Au, одержаних методами одночасної та пошарової конденсації металів, в умовах розмірних і концентраційних ефектів.

Дослідження структурно-фазового стану показало, що в плівкових системах на основі Fe і Ag або Au вже на стадії конденсації відбувається утворення неупорядкованих обмежених твердих розчинів. Уперше встановлено, що в системах (Fe + Ag)/П тверді розчини формуються на основі ГЦК-ґратки Ag (параметр ґратки $a = 0,4083$ нм); в системах (Fe + Au)/П залежно від концентрації атомів Fe стабілізується ГЦК т.р. Au(Fe) ($c_{Au} > 45$ ат.%,

$a = 0,4086$ нм) або квазіаморфний, або ОЦК т. р. α -Fe(Au) ($c_{Au} = 15\text{--}35$ ат.%, $a = 0,3014$ нм).

Уперше одержані концентраційні залежності магнітоопору, термічного коефіцієнта опору та коефіцієнта тензочутливості для плівкових систем на основі Fe, Ni, Ag або Au в широкому інтервалі концентрацій від 2 до 85 ат.% атомів благородного металу. Показано, що максимальні значення МО (1,5–2,5 %) та мінімальні – ТКО $(0,8\text{--}1,0) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ спостерігаються при концентрації атомів благородного металу від 65 до 70 ат.%, що свідчить про можливість практичного застосування таких плівкових матеріалів, як температурно-стабільних елементів сенсорів магнітного поля.

Ключові слова: плівкові системи, феромагнітні та благородні метали, пошарова і одночасна конденсація, тверді розчини, магнітоопір, термічний коефіцієнт опору, коефіцієнт тензочутливості, ефект Керра.

АННОТАЦІЯ

Пилипенко А. В. Электрофизические и магниторезистивные свойства пленочных систем на основе Fe, Ni и Ag или Au. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2019.

Диссертация посвящена установлению общих закономерностей в электрофизических, магниторезистивных и магнитооптических свойствах пленочных систем на основе Fe, Ni и Ag или Au, полученных методами одновременной и послойной конденсации металлов, в условиях размерных и концентрационных эффектов.

Установлено, что в пленочных системах на основе Fe и Ag или Au уже на стадии конденсации происходит образование неупорядоченных ограниченных твердых растворов. Впервые показано, что в системах (Fe + Ag)/П (П – подложка) твердые растворы формируются на основе ГЦК-решетки Ag (параметр решетки $a = 0,4083$ нм), а в системах (Fe + Au)/П в зависимости от концентрации атомов Fe стабилизируется ГЦК т. р. Au(Fe) ($c_{Au} > 45$ ат.%, $a = 0,4086$ нм) или ОЦК т. р. α -Fe (Au) ($c_{Au} = 15\text{--}35$ ат.%, $a = 0,3014$ нм).

Впервые получены концентрационные зависимости магнитосопротивления (МС), термического коэффициента сопротивления (ТКС) и коэффициента тензочувствительности (КТ) в широком интервале концентраций (до 90 ат.%) атомов благородного металла. Установлено, что при концентрации $c_{Ag} \cong 65\text{--}70$ ат.% наблюдаются максимальные значения МС: 1,5–2,0 % (пленочные системы на основе Fe и Ag) и 0,5–0,6 % (пленки на основе пермаллоя и Ag). Анализ температурных зависимостей удельного сопротивления и ТКС показал, что изменение концентрации компонент наиболее существенно влияет на характер зависимости $\rho(T)$ для пленок (Fe + Au)/П в результате структурного перехода

т. р. Au(Fe) \rightarrow т. р. α -Fe(Au). Замена Fe на слой ферромагнитного Ru улучшает температурную стабильность образцов (Ru + Ag)/Pt, о чем свидетельствует их стабильный двухфазный состав (ГЦК-Ni₃Fe + ГЦК-Ag) до и после термообработки до 700 К. Установлено, что при концентрации атомов Ag или Au от 65 до 70 ат.% наблюдаются максимальные значения МО (1,5–2,5 %) и минимальные – ТКО (0,8–1,0) $\cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, что свидетельствует о возможности практического применения таких пленочных материалов, как температурно-стабильные элементы сенсоров магнитного поля. Анализ деформационных зависимостей показал, что в системах на основе Fe и Ag или Au, полученных методом одновременной конденсации, величина интегрального коэффициента продольной тензочувствительности составляет до 37 единиц при $c_{\text{Ag, Au}} = 35$ ат.%. Замена Fe на ферромагнитный сплав на основе Fe и Ni ведет к дальнейшему росту КТ – до 50 единиц.

Ключевые слова: пленочные системы, ферромагнитные и благородные металлы, послойная и одновременная конденсация, твердые растворы, магнитосопротивление, термичный коэффициент сопротивления, коэффициент тензочувствительности, эффект Керра.

ABSTRACT

Pylypenko O. V. Electrophysical and magnetoresistive properties of film systems on the basis of Fe, Ni and Ag or Au. – Manuscript.

The thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D) on physical and mathematical sciences, speciality 01.04.07 – Solid State Physics. – Sumy State University, Sumy, 2019.

The thesis is devoted to the establishment of general laws in the electrophysical, magnetoresistive and magneto-optical properties of film systems based on Fe, Ni and Ag or Au, obtained by the methods of simultaneous and layer-by-layer condensation of metals, in conditions of size and concentration effects.

The study of the structural-phase state has shown that in the film systems based on Fe and Ag or Au, the formation of disordered bounded solid solutions is already in the condensation stage. It was first established that in systems (Fe + Ag)/S solid solutions are formed on the basis of the fcc Ag lattice (lattice parameter $a = 0,4083 \text{ nm}$); in systems (Fe + Au)/S, depending on the concentration of Fe atoms, stabilizes the fcc s. s. Au(Fe) ($c_{\text{Au}} > 45 \text{ at.}\%$, $a = 0,4086 \text{ nm}$) or quasi-amorphous or bcc s. s. α -Fe(Au) ($c_{\text{Au}} = 15\text{--}35 \text{ at.}\%$, $a = 0,3014 \text{ nm}$).

For the first time, the concentration dependences of magnetoresistance, the thermal resistance coefficient and the strain coefficient for Fe, Ni, Ag or Au film systems in a wide range at the concentrations from 2 to 85 ат.% of noble metal atoms were obtained. It was shown that the maximum MR (1,5–2,5%) and the minimum – TCR (0,8–1,0) $\cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ are observed at concentrations of noble metal atoms from 65 to 70 ат.%, which suggests the possibility of the practical application of such film

materials as temperature-stable elements of magnetic field sensors.

Key words: film systems, ferromagnetic and noble metals, layered and simultaneous condensation, solid solution, magnetoresistance, thermal coefficient of resistance, strain coefficient, Kerr effect.

Підписано до друку 24.05.2019.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 432.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.